

I—20 サンドクッション材上への落石による衝撃力の評価について

専修大学北海道短大 正員 三 上 敬 司
 日本大学生産工学部 正員 能 町 純 雄
 室蘭工業大学 正員 松 岡 健 一

1. まえがき

山岳地帯や海岸地帯の道路に落石から道路交通の安全性を高めるための構造物として落石覆工が用いられている。この構造物は、落石覆に作用する衝撃力の緩和と作用荷重分散を目的とするために、落石覆工の床版上に緩衝材（サンドクッション）として山砂、砕砂等を敷いている。しかしながら、落石覆工の設計、施工における荷重及び構造の選択は、現場の状況から判断して、その都度、経験工学的に決定されている。

そこで、この種の問題においては、多くの研究者によって実験及び理論解析が行われている。落石衝撃力の推定を目的とした実験に関しては、金沢大学の吉田らが、コンクリート舗装上のサンドクッション材上への落石の衝撃加速度と衝撃土圧¹⁾、さらに、落石覆工屋根上への衝撃特性及び覆工屋根の挙動²⁾等を実験によって明らかにした。建設省土木研究所では、敷砂上への落石の衝撃力を明らかにした³⁾。理論解析では、従来、Hertzの接触変形理論を用いた振動便覧式⁴⁾があるが、この式は、土の非弾性効果を考慮に入れていない。そこで、園田らは、Hertzの式を改良し、Kelvin・Voigtモデルを用いて土の非弾性効果の一部を考慮した衝撃力を求めている。⁵⁾

金沢大学の吉田らと建設省土木研究所の実験によれば、平底重錘の衝撃加速度は、錐底、球底重錘の衝撃加速度の2～3倍であると報告している。平底重錘に関して、著者らは、これらの実験データに基づいて、サンドクッション材を三要素モデルと仮定し、平底重錘の衝撃加速度と落下高さ、衝撃加速度と（落下高さ／貫入量）との関係、さらに、衝撃力の時間的変化を求めた理論値と吉田らの実験値とが良く一致した⁶⁾。しかし、土圧による衝撃力は、測定衝撃力の2分の1程度の大きさであると報告されている。そこで、本論文は、図1のようにサンドクッション材の質量を考慮に入れた三要素モデルとして、重錘の衝撃力、落石覆工に作用する衝撃力と実験データとを比較検討した。

2. 理論解析

図2は、落石覆工屋根のサンドクッション材上へ落石が落ちた場合のモデルとして、無限板上のサンドクッション材の質量を考慮に入れた三要素モデルである。この上へ質量Mの平底剛体が初速度 V_0 で落下した場合の剛体の衝撃力と無限板上に作用する衝撃力を求める。

図1のように、密度 ρ 、ポアソン比 ν 、弾性係数E、剛度D、厚さdの無限板上に衝撃力Pが作用している場合、半径方向r、円周方向 θ 、無限板の中立軸の鉛直方向変位wの振動方程式は、次式となる。

$$\rho d \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) w = P \quad \dots \dots \dots (1)$$

(1)式を時間について、Laplace変換し、 $w = r J_0(r\xi)$ とおいて、rについて、Bessel積分した式を ξ について逆変換し、さらに、 $r=0$ での中立軸の鉛直方向変位 w_0 は、次式となる。

$$L[w_0] = L[P] / s a \quad (\text{ただし、} a = 8\sqrt{\rho D d}, s: \text{Laplace演算子}) \quad \dots \dots (2)$$

建設省土木研究所の報告によると、重錘とともに貫入するサンドクッションの一部を付加質量としている。（重錘直径と貫入領域深さyから成る円柱状領域からなるものとした、 $y = (0.6 \sim 0.8 h)$ ）

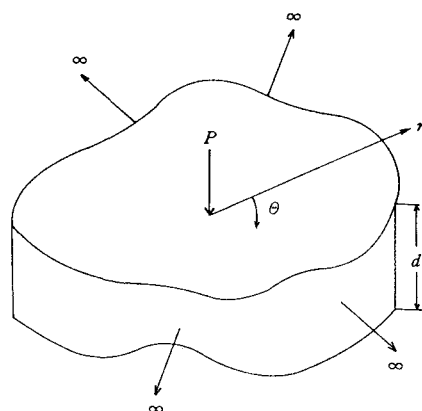


図1—無限板上に作用する衝撃力

サンドクッション材に関して、図2のように、この付加質量 M_2 をバネとダッシュポットとの減衰バネとも一つのダッシュポットの間に付け加えた三要素モデルと仮定した。この三要素モデルへ質量 M_1 の平底剛体が初速度 V_0 で落下させた場合の運動方程式は、次式となる。

$$M_1 d^2 w_1 / dt^2 + P_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ところで、 w_1 : バネとダッシュポットとの並列された減衰バネの変位、 P_1 : 剛体が受ける衝撃力

剛体が受ける衝撃力 P_1 と減衰バネとの力の釣り合いは、次式となる。

$$P_1 = K \delta_1 + C_1 d \delta_1 / dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

ところで、 $\delta_1 = w_1 - w_2 \quad \dots\dots\dots (5)$

w_2 : 付加質量下のダッシュポットの変位である。

付加質量 M_2 の運動方程式は、次式となる。

$$M_2 d^2 w_2 / dt^2 - P_1 + P_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

落石覆工屋根が受ける衝撃力とダッシュポットとの力の釣り合いは、次式となる。

$$P_2 = C_2 d \delta_2 / dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

ところで、 $\delta_2 = w_2 - w_0 \quad \dots\dots\dots (8)$

(3) 式～(8) 式をそれぞれ Laplace 変換

して、剛体が受ける衝撃力 P_1 は、次式となる。

図2-仮想質量を考慮した無限板上の三要素モデル

$$L[P_1] = C_1 (s^2 + a_1 s + a_0) V_0 / (s^3 + \alpha s^2 + \beta s + \gamma) \quad \dots\dots\dots (9)$$

落石覆工屋根上に受ける衝撃力 P_2 は、次式となる。

$$L[P_2] = C_1 C_2 (s^2 + a_1 s + a_0) V_0 / [M_2 (C_2/a + 1)(s^3 + \alpha s^2 + \beta s + \gamma)] \quad \dots\dots (10)$$

仮想質量上の減衰バネの変位は、次式となる。

$$L[w_1] = (s^2 + a'_1 s + a'_0) V_0 / [s(s^3 + \alpha s^2 + \beta s + \gamma)] \quad \dots\dots\dots (11)$$

仮想質量下のダッシュポットの変位は、次式となる。

$$L[w_2] = C_1 (s^2 + a_1 s + a_0) V_0 / [M_2 s(s + b)(s^3 + \alpha s^2 + \beta s + \gamma)] \quad \dots\dots\dots (12)$$

ところで、 $V_0 = \sqrt{2gH}$ 、 $\omega = \sqrt{K/M_1}$ 、 $a_1 = C_2/[M_2(C_2/a + 1)] + K/C_1$ 、 $a_0 = K/M_1$
 $\alpha = C_2/[M_2(C_2/a + 1)] + C_1(M_1/M_2 + 1)/M_1$ 、 $\beta = C_1 C_2/[M_1 M_2(C_2/a + 1)] + K(M_1/M_2 + 1)/M_1$ 、 $\gamma = K C_2/[M_1 M_2(C_2/a + 1)]$ 、 $a'_1 = C_2/[M_2(C_2/a + 1)] + C_1/M_2$ 、 $a'_0 = K/M_2$

(9) 式～(12) 式をそれぞれ Laplace 逆変換を施すと、

$$P_1 = M_1 V_0 (2 h_1 \omega) [A_{11} e^{-ct} + A_{12} e^{-dt} + A_{13} e^{-ft}] \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$P_2 = M_1 V_0 (4 \mu h_1 h_2 \omega^2) / (2 h_2 \omega / \omega_0 + 1) [A_{21} e^{-bt} + A_{22} e^{-ct} + A_{23} e^{-dt} + A_{24} e^{-ft}] \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$w_1 = V_0 [a'_0 / (c d f) - B_{11} e^{-ct} - B_{12} e^{-dt} - B_{13} e^{-ft}] \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$w_2 = \mu V_0 (2 h_1 \omega) [a_0 / (b c d f) - B_{21} e^{-bt} - B_{22} e^{-ct} - B_{23} e^{-dt} - B_{24} e^{-ft}] \quad \dots\dots (16)$$

$$\delta = w_1 + w_2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

ところで、 $b = C_2/[M_2(C_2/a + 1)]$ 、 c, d, f は $s^3 + \alpha s^2 + \beta s + \gamma = 0$ の根である。

$\omega_0 = a/M_2$ 、 $C_1/M_1 = 2 h_1 \omega$ 、 $C_2/M_2 = 2 \mu h_2 \omega$ 、 $M_1/M_2 = \mu$

$A_{11} = (c^2 - a_1 c + a_0) / [(d - c)(f - c)]$ 、 $A_{12} = (d^2 - a_1 d + a_0) / [(c - d)(f - d)]$ 、
 $A_{13} = (f^2 - a_1 f + a_0) / [(c - f)(d - f)]$ 、 $A_{21} = (b^2 - a_1 b + a_0) / [(c - b)(d - b)(f - b)]$ 、
 $A_{22} = A_{11}/(b - c)$ 、 $A_{23} = A_{12}/(b - d)$ 、 $A_{24} = A_{13}/(b - f)$

$$B_{11}=(c^2-a_1'c+a_0')/[c(d-c)(f-c)], B_{12}=(d^2-a_1'd+a_0')/[d(c-d)(f-d)],$$

$$B_{13}=(f^2-a_1'f+a_0')/[f(c-f)(d-f)], B_{21}=(b^2-a_1b+a_0)/[b(c-b)(d-b)(f-b)],$$

$$B_{22}=A_{11}/[c(b-c)], B_{23}=A_{12}/[d(b-d)], B_{24}=A_{13}/[f(b-f)]$$

3. 数値計算例

数値計算例は、平底剛体の質量 $M_1=1\text{ t}$ 、仮想質量 $M_2=0.824\text{ t}$ とした。図3、図4では、バネ定数 $K=450\text{ tf/m}$ 、減衰定数 $h_1=0.34$ 、 $h_2=0.56$ 、金沢大学で行われたコンクリート舗装上のサンドクッション上への落石実験のデータ（コンクリート舗装のポアソン比 $\nu=1/6$ 、弾性係数 $E=3.5\times 10^6\text{ tf/m}^2$ 、密度 $\rho=2.5\text{ t/m}^3$ 、厚さ $d=0.3\text{ m}$ ）、図5、図6では、バネ定数 $K=450\text{ tf/m}$ 、減衰定数 $h_1=0.305$ 、 $h_2=0.7$ 、落石覆工屋根上のサンドクッション上への落石実験のデータ（ポアソン比 $\nu=1/6$ 、弾性係数 $E=3.3\times 10^6\text{ tf/m}^2$ 、密度 $\rho=2.5\text{ t/m}^3$ 、厚さ $d=0.84\text{ m}$ ）を用いて、数値計算を行った。

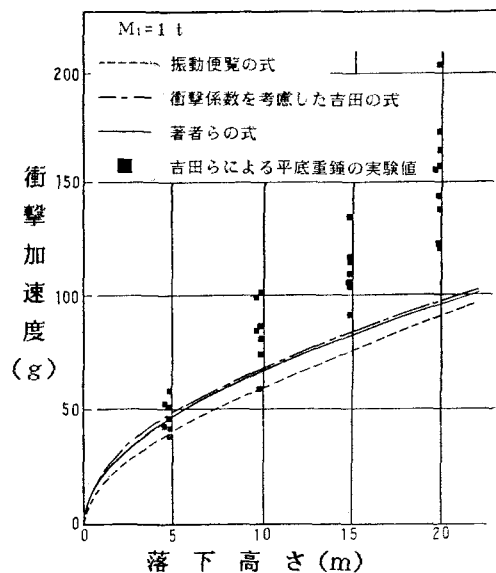


図3-衝撃加速度と落下高さ

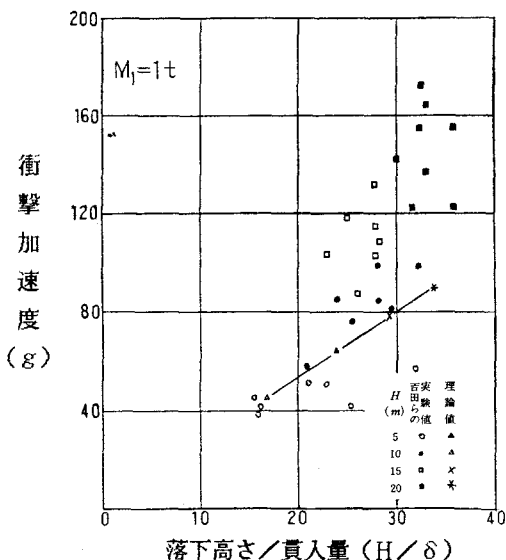


図4-衝撃加速度と落下高さ／貫入量

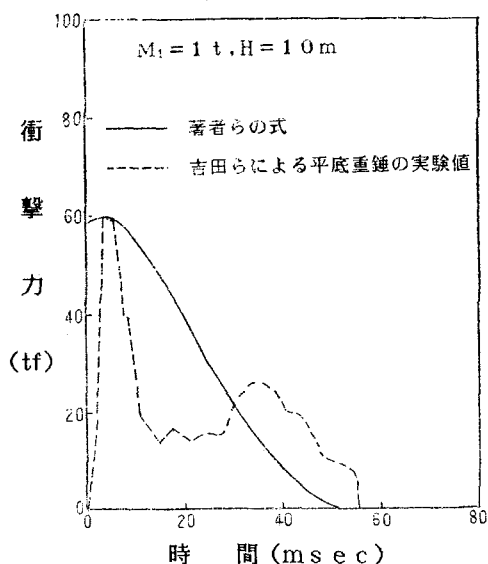


図5-重錘が受ける衝撃力と時間

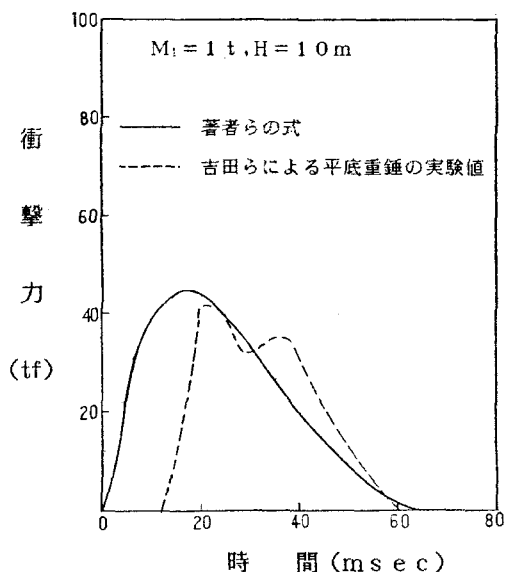


図6-土圧による衝撃力と時間

図3は、質量1 tの平底重錘の衝撃加速度と落下高さとの関係を示している。著者らの式は、吉田らの実験値に対しては、落下高さ $H=5, 10\text{m}$ のところで良く一致しているが、 $15, 20\text{m}$ のところでは、若干小さい衝撃加速度となっている。土の非弾性効果を考慮していない振動便覧式よりは、若干大きい値を示しているが、衝撃係数を考慮した吉田らの式とは、良く一致している。

図4は、質量1 tの平底重錘の衝撃加速度と貫入量に対する落下高さとの関係を示している。重錘の衝撃加速度と（落下高さ／貫入量）の関係は、著者らの式と同様に、実験においても直線関係にあり、著者らの式の勾配は、実験の勾配より若干緩やかである。著者らの式は、落下高さが $5, 10\text{m}$ のところでは実験値と良く一致しているが、 $15, 20\text{m}$ のところでは、実験の衝撃加速度より小さい値となっている。

図5は、質量1 tの平底重錘を高さ 10m から落下させた場合の重錘の衝撃力の時間的変化を示している。著者らの式に関して、最大衝撃力、最大衝撃力までの時間、衝撃作用時間ともに実験値と良く一致している。しかし、著者らの式では、第1ピークのみでその後、緩やかに減衰するが、実験値は、第1ピークでは鋭く立上がり、第2ピークでは、第1ピークより小さく、緩やかに減衰している。

図6は、質量1 tの平底重錘を高さ 10m から落下させた場合の土圧による衝撃力の時間的変化を示している。本論の式の衝撃力は、時間 $t=0$ で生じ、 $t=17\text{msec}$ で最大衝撃力となり、その後、緩やかに減衰して $t=64\text{msec}$ で終了している。それに対して、吉田らの実験では、土圧より衝撃力を求めているため、衝撃力は、時間 $t=12\text{msec}$ で生じ、 $t=20\text{msec}$ で最大衝撃力となり、 $t=38\text{msec}$ で第2ピークが生じ、その後、緩やかに減衰している。

4. あとがき

本論で得られた結果は、次の通りである。

1) コンクリート舗装への落石衝撃について

I) 著者らの式は、重錘の衝撃加速度と落下高さとの関係について、吉田らの実験値の低い落下高さところでは一致しているが、高い落下高さのところでは、衝撃加速度が若干低い値となっている。衝撃係数を考慮した吉田の式と一致している。重錘の衝撃加速度と（落下高さ／貫入量）との関係は、吉田らの実験値においても直線関係にあると見做せるが、著者らの式の方が、やや緩い勾配となっている。

2) 落石覆工屋根への落石衝撃について

II) 吉田らの実験の土圧による衝撃力の開始時間は、衝撃波がサンドクッション内を伝搬している時間分だけ重錘の衝撃力、著者らの式より遅れて生じている。しかし、著者らの式は、重錘の衝撃力と土圧による衝撃力の時間的変化、最大衝撃力、最大衝撃力までの時間、衝撃作用時間に対しては実験値と良く一致している。

この数値計算は、北海道大学大型計算機センターのHITAC-280Hで行った。

5. 参考文献

- 1) 吉田博，榎谷浩，鈴木哲次：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第352号／Ⅲ-2，p p. 127～137, 1984.
- 2) 吉田博，榎谷浩，岡衛：落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について，土木学会論文報告集，第362号／I-4，p p. 461～470, 1985.
- 3) 佐々木康，古賀泰之：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第340号，p p. 127～137, 1983.
- 4) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，p p. 320～324, 1966.
- 5) 園田恵一郎，小林治俊，鈴木輝男：ロックシェッドに対する落石荷重計算法（ヘルツ式の改良）について，第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，p p. 25～35, 1983.
- 6) 三上敬司，能町純雄，松岡健一，金子孝吉：サンドクッション材上への落石の衝撃力の評価，専修大学北海道短期大学紀要，第18号，p p. 63～70, 1985.